

CONDUCEREA INTELIGENTĂ A PROCESELOR DE TRATARE A APEI REZIDUALE

Aurelia-Florinela Cosmescu

Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare în Informatică – ICI, București
(reli@std.ici.ro)

Rezumat: Procesul de tratare cu nămol activat este cel mai cunoscut proces de tratare a apei reziduale și constituie o provocare pentru sistemele de conducere a proceselor deoarece este neliniar, variază în timp, are o dinamică destul de complicată, este multivariabil, puternic cuplat și afectat de perturbații mari. Conducerea unui astfel de proces este dificil sau chiar imposibil de realizat folosind metodele convenționale și, de aceea, soluția constă în folosirea tehnicilor inteligente de conducere. Acest articol se ocupă de conducerea fuzzy multivariabilă a procesului de tratare cu nămol activat. Simulările au fost făcute folosind MATLAB 6.5/Simulink și Fuzzy Logic Toolbox.

Cuvinte cheie: tratarea apei reziduale, procesul de tratare cu nămol activat, conducere multivariabilă, regulator fuzzy.

1. Introducere

Apa reziduală reprezintă debitul de apă folosită, obținut de la întreaga comunitate. Înainte de a fi eliberată în mediul înconjurător, aceasta trebuie transportată la stațiile de epurare a apei. Cantitatea de apă reziduală din stațiile de epurare variază în funcție de momentul zilei și de anotimp.

Procesul de tratare a apei reziduale (*WasteWater Treatment Process – WWTP*) are următoarele caracteristici:

- volumul zilnic de apă reziduală tratată poate fi foarte mare;
- existența unor perturbații foarte mari;
- apa reziduală de intrare trebuie acceptată și tratată, neputând fi returnată la furnizor;
- procesul este dependent de microorganisme.

La început, în procesul de tratare a apei reziduale, s-au folosit tehnologii simple de conducere, și nu tehnologii de conducere automată, din următoarele motive:

- procesul este foarte complex și, de aceea, este dificil de controlat și optimizat;
- pompele, valvele și elementele de execuție nu sunt controlabile; adesea acestea au numai stările „deschis” (on) sau „închis” (off);
- tratarea apei reziduale este considerată un proces neproductiv, iar sistemele de conducere sunt destul de scumpe și, din aceste motive, de obicei, nu se folosesc asemenea sisteme avansate.

În ultimii ani, cantitatea de apă reziduală a crescut, simultan cu scăderea calității acesteia. De aceea, a început să se manifeste interesul în aplicarea unor metode mai complicate de conducere. De exemplu, conducerea inteligentă poate fi aplicată procesului de tratare a apei reziduale în scopul obținerii unei calități mai bune a apei și pentru rezolvarea rapidă a oricărui defect sau situație periculoasă.

Rolul unei stații de epurare a apei reziduale este să grăbească procesul prin care apa se purifică. Într-o stație de epurare, apa reziduală este, în general, procesată în mai multe etape:

- **tratarea mecanică** – în această etapă, se elimină materialele solide din apă. Eliminarea materialelor care plutesc se face folosind bare, grătare, site fine sau de tăiere etc.;
- **tratarea biologică** – în această etapă, microorganismele degradează materia organică, iar în anumite configurații se elimină substanțele nutritive (poluanții). Există diferite tehnici de tratare biologică, cea mai cunoscută fiind tratarea cu nămol activat, în care nămolul activat, adică microorganismele (în special, bacteriile) „se ocupă” cu degradarea (adică oxidarea) materiei organice;
- **tratarea chimică** – substanțele chimice acționează asupra solidelor în suspensie, bacteriilor, în rezervoare de dozare, amestecare și flocurare;
- **dezinfecția** – aceasta este etapa de clorurare și de neutralizare a organismelor patogene;
- **tratarea nămolului** – în această etapă, se face digestia anaerobă a nămolului, care are ca rezultat degradarea materiei organice și distrugerea majorității bacteriilor și microorganismelor, scopul fiind obținerea unui nămol mai puțin nociv.

Structura unei astfel de stații este prezentată în figura 1 [7].

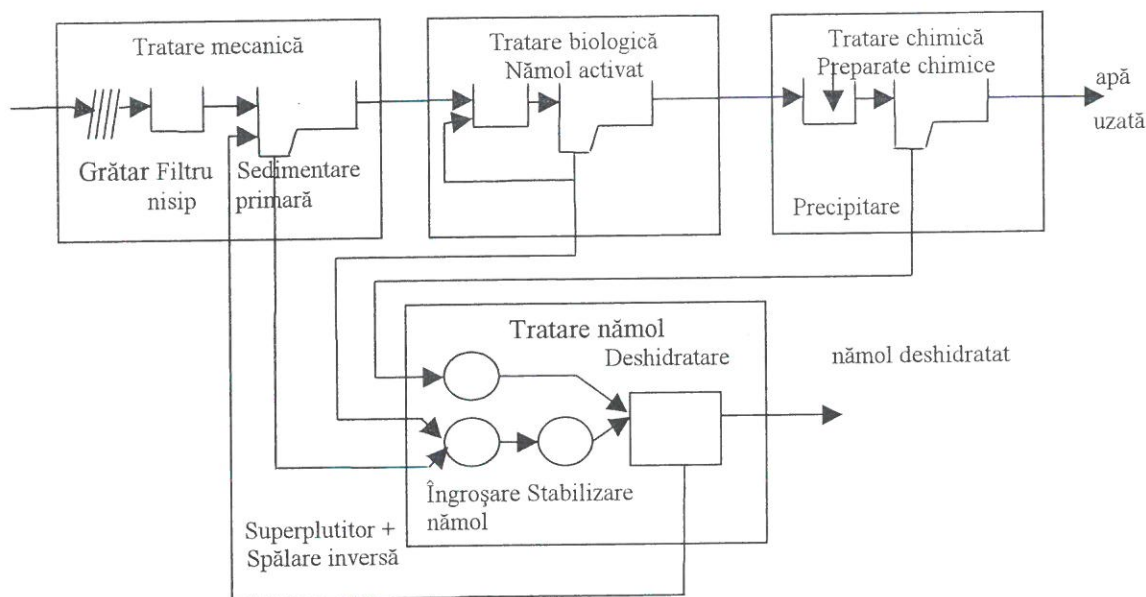


Figura 1. Structura unei stații de tratare a apei reziduale

Procesul de tratare cu nămol activat este cel mai cunoscut proces de tratare a apei reziduale și constituie o provocare pentru sistemele de conducere a proceselor, din următoarele motive:

- procesul este neliniar;
- procesul variază în timp;
- dinamica procesului este complicată
- procesul este multivariabil și puternic cuplat;
- procesul este afectat de perturbații mari, ca de exemplu debitul de intrare.

2. Conducerea multivariabilă a procesului de tratare a apei reziduale

Procesul de tratare cu nămol activat este un proces *multivariabil*, adică are mai multe intrări (*variabile manipulate*) și mai multe ieșiri (*variabile conduse*), iar o intrare afectează mai multe ieșiri. De exemplu, o modificare a debitului de aer afectează concentrația de amoniu și concentrația de nitrat. De asemenea, procesul este și *neliniar*, dinamica acestuia depinzând de debitele și de concentrațiile actuale.

Conducerea unui asemenea proces este, adesea, imposibil de realizat folosind instrumente de conducere convențională atât din cauza existenței unor puternice neliniarități și a unor parametri care variază în timp, cât și a cuplărilor complexe între variabile. Din acest motiv, în ultima vreme, a crescut interesul în folosirea tehnicilor de conducere inteligentă [9].

În cazul unui proces multivariabil, proiectarea regulatorului trebuie făcută astfel încât să se țină seama de toate interacțiunile procesului. La început, în procesul de tratare cu nămol activat, s-au folosit numai strategii de conducere de tip SISO (Single-Input Single- Output) pentru controlul concentrației de nitrat și a celei de amoniu. De exemplu, nivelul de nitrat poate fi controlat prin variația debitului intern recirculat [8] sau a debitului extern de carbon [5], iar nivelul de amoniu se poate controla prin oxigenul dizolvat [6].

În cazul în care se ia în considerare natura MIMO a procesului, performanțele obținute se vor îmbunătăți semnificativ. În literatura de specialitate, există câteva exemple de conducere multivariabilă, aplicată la procesul de tratare a apei reziduale [1], [11]. S-au proiectat, astfel, regulatoare multivariabile, dar numai în scopul validării strategiei de conducere, pe modele simplificate.

În figura 2, este reprezentat procesul multivariabil de tratare cu nămol activat, pentru care:

- intrările sunt următoarele: valoarea de referință a oxigenului dizolvat (DO), dozajul extern de carbon, debitul intern recirculat;
- ieșirile sunt următoarele: amoniul din ultima zonă aerată, nitratul din ultima zonă aerată;
- perturbațiile măsurabile sunt următoarele: debitul apei de intrare, carbonul de intrare, amoniul de intrare.

- ieșirile sunt următoarele: amoniul din ultima zonă aerată, nitratul din ultima zonă aerată;
- perturbațiile măsurabile sunt următoarele: debitul apei de intrare, carbonul de intrare, amoniul de intrare.

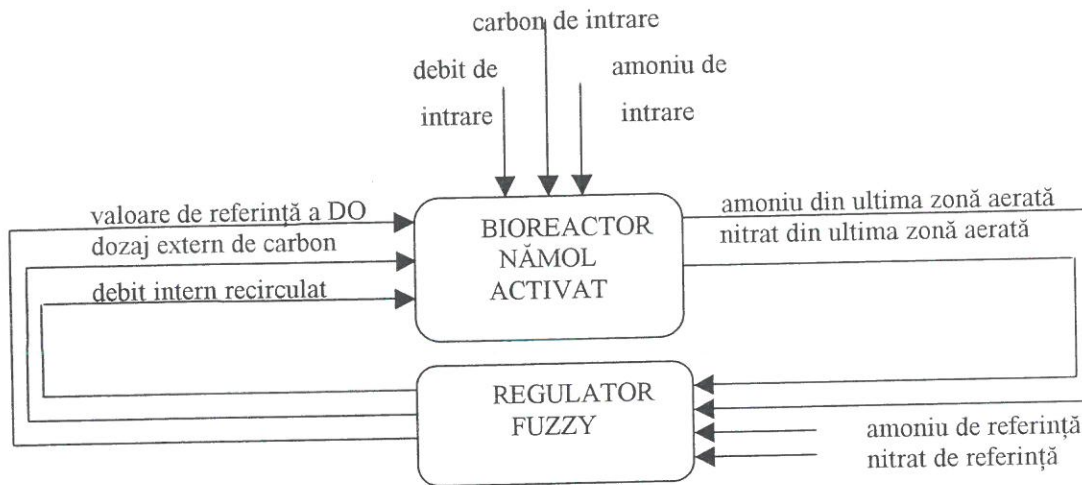


Figura 2. Procesul de tratare cu nămol activat

Există mai multe modele pentru procesul de tratare cu nămol activat, cele mai cunoscute fiind *IAWQ Activated Sludge Model no. 1 (IAWQ AS Model no. 1)* [4] și *IAWQ Activated Sludge Model no. 2 (IAWQ AS Model no. 2)* [2], pentru bioreactor, și *modelul de decantare-îngroșare* [10] pentru decantor.

În continuare, se va alege un model simplificat, bazat pe *IAWQ AS Model no. 1*, care modelează numai procesele care sunt semnificative pe o scală medie de timp (de la câteva ore, la câteva zile). Procesul de tratare cu nămol activat va fi modelat ca un sistem cu două bazine, unul anoxic și celălalt aerat. Procesul anoxic (denitrarea) va avea loc în bazinul anoxic iar procesul aerobic (nitrarea) în bazinul aerat. Se va presupune că valoarea concentrației de DO în bazinul anoxic este egală cu zero ($S_O(1) = 0$) și că volumele celor două bazine sunt egale ($V_1 = V_2$).

Ecuțiile diferențiale care descriu acest model sunt următoarele [3]:

$$\frac{dS_{NH}(1)}{dt} = \frac{Q}{V_1} S_{NH,in} - \frac{Q+Q_i}{V_1} S_{NH}(1) + \frac{Q_i}{V_1} S_{NH}(2) - i_{XB} P_2(1) \quad (1)$$

$$\frac{dS_{NH}(2)}{dt} = \frac{Q+Q_i}{V_2} S_{NH}(1) - \frac{Q+Q_i}{V_2} S_{NH}(2) - i_{XB} P_1(2) - (i_{XB} + \frac{1}{Y_A}) P_3(2) \quad (2)$$

$$\frac{dS_{NO}(1)}{dt} = -\frac{Q+Q_i}{V_1} S_{NO}(1) + \frac{Q_i}{V_1} S_{NO}(2) - \frac{1-Y_H}{2.86Y_H} P_2(1) \quad (3)$$

$$\frac{dS_{NO}(2)}{dt} = \frac{Q+Q_i}{V_2} S_{NO}(1) - \frac{Q+Q_i}{V_2} S_{NO}(2) + \frac{1}{Y_A} P_3(2) \quad (4)$$

$$\frac{dS_S(1)}{dt} = \frac{Q}{V_1} S_{S,in} - \frac{Q+Q_i}{V_1} S_S(1) + \frac{Q_i}{V_1} S_S(2) - \frac{1}{Y_H} P_2(1) \quad (5)$$

$$\frac{dS_S(2)}{dt} = \frac{Q+Q_i}{V_2} S_S(1) - \frac{Q+Q_i}{V_2} S_S(2) - \frac{1}{Y_H} P_1(2) \quad (6)$$

$$P_1(1) = \mu_H \frac{S_S(1)}{K_S + S_S(1)} \frac{S_O(1)}{K_{OH} + S_O(1)} X_{BH} \quad (7)$$

$$P_1(2) = \mu_H \frac{S_S(2)}{K_S + S_S(2)} \frac{S_O(2)}{K_{OH} + S_O(2)} X_{BH} \quad (8)$$

$$P_2(1) = \mu_H \frac{S_S(1)}{K_S + S_S(1)} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O(1)} \frac{S_{NO}(1)}{K_{NO} + S_{NO}(1)} \eta_g X_{BH} \quad (9)$$

$$P_2(2) = \mu_H \frac{S_S(2)}{K_S + S_S(2)} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O(2)} \frac{S_{NO}(2)}{K_{NO} + S_{NO}(2)} \eta_g X_{BH} \quad (10)$$

$$P_3(1) = \mu_A \frac{S_{NH}(1)}{K_{NH} + S_{NH}(1)} \frac{S_O(1)}{K_{OA} + S_O(1)} X_{BA} \quad (11)$$

$$P_3(2) = \mu_A \frac{S_{NH}(2)}{K_{NH} + S_{NH}(2)} \frac{S_O(2)}{K_{OA} + S_O(2)} X_{BA} \quad (12)$$

Trebuie menționat faptul că P_1 reprezintă creșterea aerobică a heterotrofilor, P_2 reprezintă creșterea anoxică a heterotrofilor, P_3 reprezintă creșterea aerobică a autotrofilor, iar indicii 1, respectiv 2 se referă la bazinul anoxic, respectiv bazinul aerat.

Intrările pentru bioprocesul descris prin ecuațiile de mai sus sunt:

- debitul intern recirculat - Q_i ;
- concentrația de DO din bazinul aerat - $S_O(2)$ ($S_O(2) = S_{O_{ref}}$);
- dozajul extern de carbon - $S_{S_{dozaj}}$.

Ieșirile bioprocesului sunt următoarele:

- concentrația de amoniu la ieșire - $S_{NH}(2)$ (pentru un bazin bine amestecat, aceasta fiind egală cu concentrația de amoniu din bazinul aerat);
- concentrația de nitrat la ieșire - $S_{NO}(2)$ (pentru un bazin bine amestecat, aceasta fiind egală cu concentrația de nitrat din bazinul aerat).

Perturbațiile care acționează asupra bioprocesului sunt:

- debitul apei de intrare - Q ;
- carbonul de intrare - $S_{S,in}$;
- amoniul de intrare - $S_{NH,in}$.

3. Exemplu

S-a luat ca exemplu controlul concentrației de amoniu și al concentrației de nitrat în bazinul aerat, în absența dozajului extern de carbon ($S_{S_{dozaj}} = 0$) pentru bioprocesul din figura 3.

Parametrii folosiți în simulare au următoarele valori:

$$V_1 = V_2 = 2000 \text{ m}^3$$

$$Q = 10000 \text{ m}^3 / \text{zi}$$

$$S_{NH, in} = 30 \text{ gN} / \text{m}^3$$

$$S_{S \text{ dozaj}} = 0 \text{ gCOD} / \text{m}^3$$

$$S_{S, in} = 69,5 + S_{S \text{ dozaj}} \text{ gCOD} / \text{m}^3$$

$$\eta_g = 0.8$$

$$i_{XB} = 0.086$$

$$K_{NH} = 1 \text{ gNH}_3 - \text{N} / \text{m}^3$$

$$K_{NO} = 0.5 \text{ gNO}_3 - \text{N} / \text{m}^3$$

$$K_{OH} = 0.2 \text{ gO}_2 / \text{m}^3$$

$$K_{OA} = 0.4 \text{ gO}_2 / \text{m}^3$$

$$K_S = 20 \text{ gCOD} / \text{m}^3$$

$$\mu_A = 0.6 / \text{zi}$$

$$\mu_H = 5 / \text{zi}$$

$$X_{BA} = 110 \text{ gCOD} / \text{m}^3$$

$$X_{BH} = 2200 \text{ gCOD} / \text{m}^3$$

$$Y_A = 0.24$$

$$Y_H = 0.67$$

iar condițiile inițiale sunt:

$$S_{NH}(1)0 = 10 \text{ gN} / \text{m}^3$$

$$S_{NH}(2)0 = 9.7 \text{ gN} / \text{m}^3$$

$$S_{NO}(1)0 = 0.9 \text{ gN} / \text{m}^3$$

$$S_{NO}(2)0 = 2.15 \text{ gN} / \text{m}^3$$

$$S_S(1)0 = 2.8 \text{ gCOD} / \text{m}^3$$

$$S_S(2)0 = 0.9 \text{ gCOD} / \text{m}^3$$

Software-ul folosit în simulări a fost MATLAB 6.5/Simulink și Fuzzy Logic Toolbox.

Inițial am ales un regulator fuzzy de tip Takagi-Sugeno având următoarea configurație (figura 4):

- 9 reguli;
- funcții de apartenență triunghiulare pentru partea IF a regulilor;
- funcții de apartenență liniare pentru partea THEN a regulilor;

- numărul funcțiilor de apartenență pentru $S_{NH}(2)$, $S_{NO}(2)$ respectiv Q_i , $S_O(2)$ este egal cu 3.

Deoarece amoniul de ieșire și nitratul de ieșire nu au urmărit valorile de referință alese, am realizat acordarea manuală a acestui regulator, modificând parametrii ce îl caracterizează, adică numărul de reguli, forma funcțiilor de apartenență, amplasarea funcțiilor de apartenență și numărul funcțiilor de apartenență pentru variabilele de intrare respectiv de ieșire.

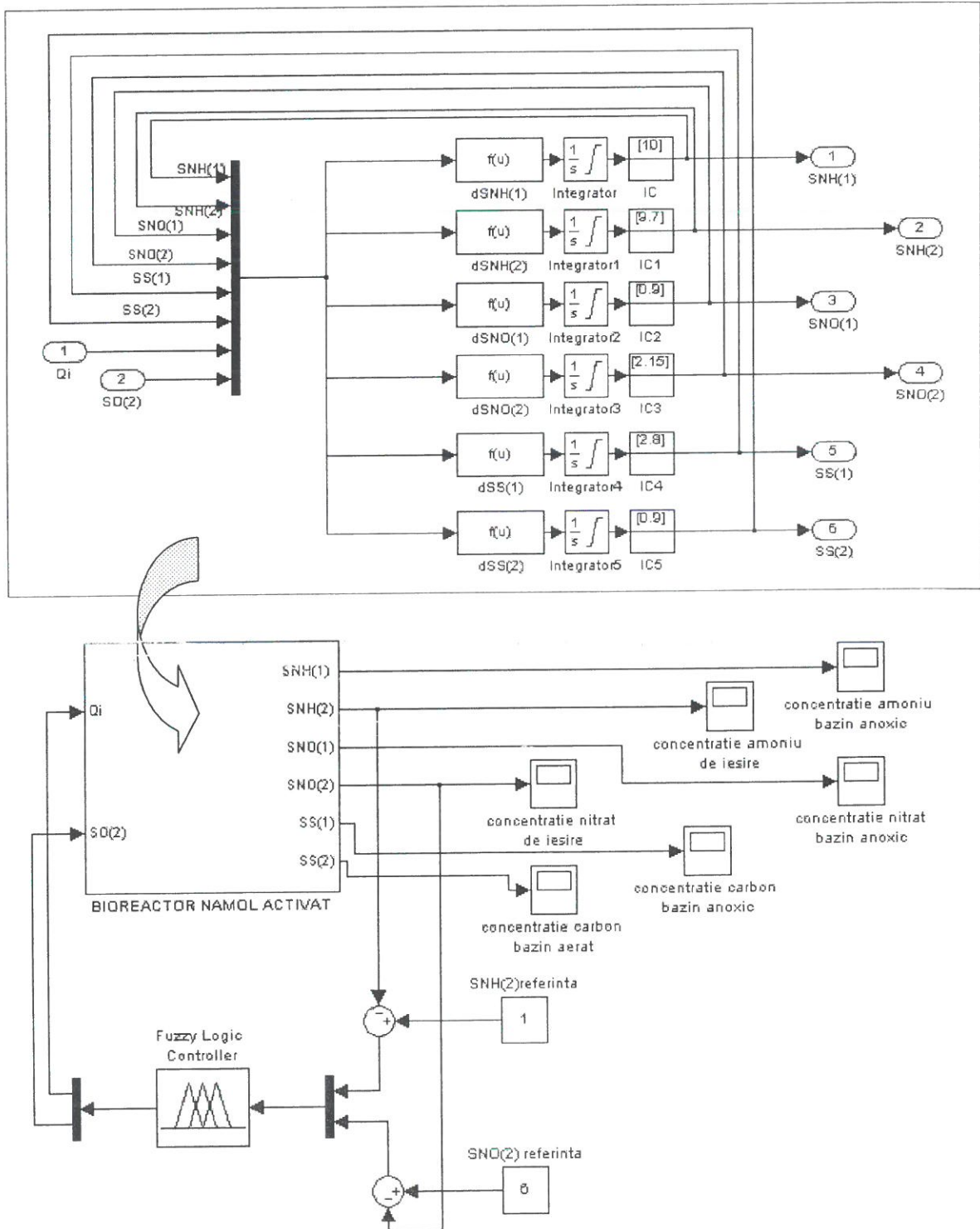


Figura 3. Conducere fuzzy multivariabilă

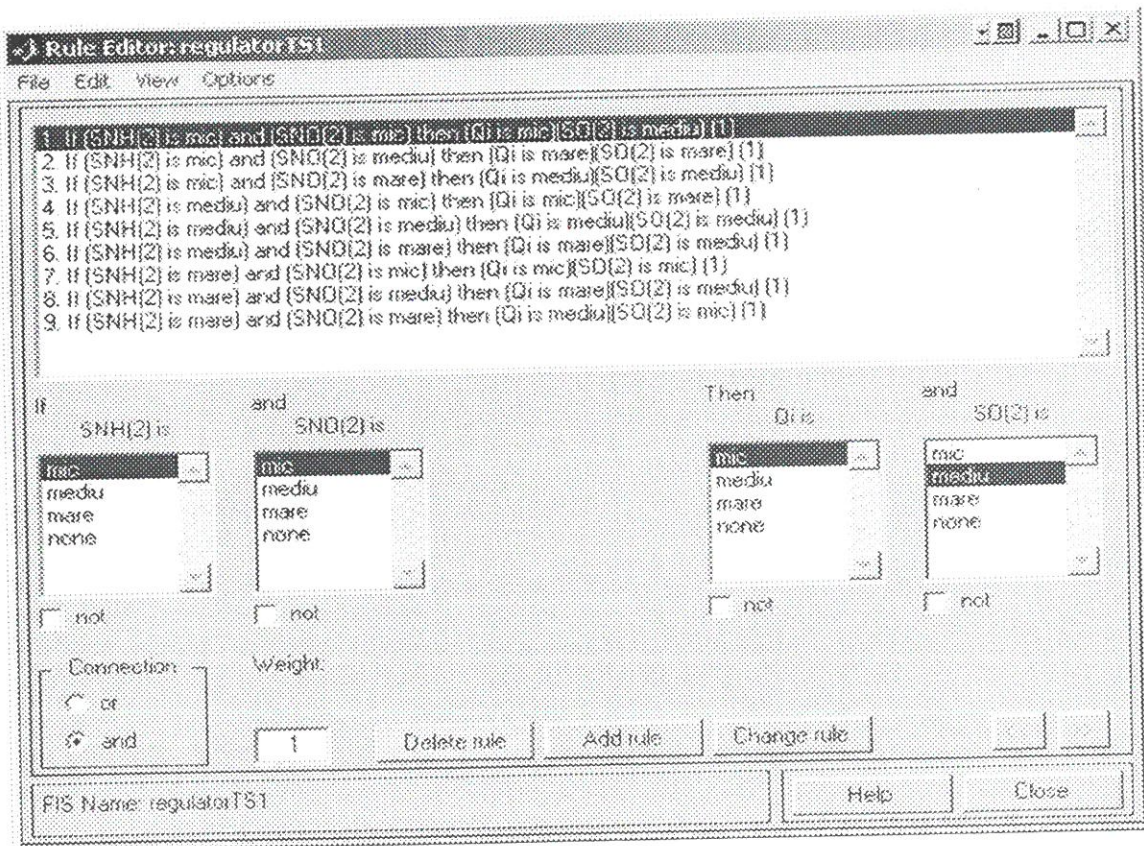
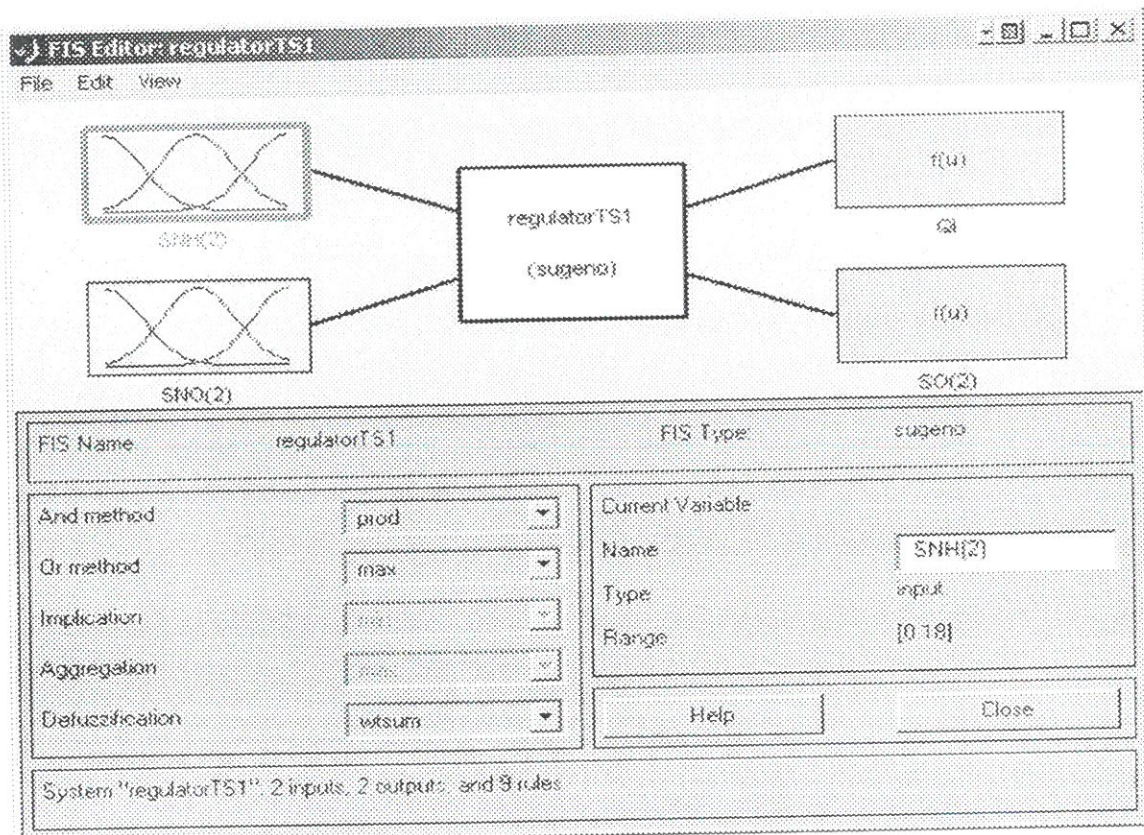


Figura 4. Regulator Takagi-Sugeno

4. Concluzii

Pentru procesul de tratare a apei reziduale am proiectat un regulator fuzzy multivariabil, de tip Takagi-Sugeno. În urma simulărilor efectuate, s-a observat că numărul de reguli, dar și numărul funcțiilor de apartenență pentru intrările și ieșirile regulatorului fuzzy influențează reglarea concentrației amoniului de ieșire și a concentrației nitratului de ieșire. În schimb, forma funcțiilor de apartenență și ponderile regulilor reprezintă factori care au o influență mică asupra reglării.

Bibliografie

1. **DOCHAIN, D., M. PERRIER:** Control Design for Nonlinear Wastewater Treatment Processes. În: Wat. Sci. Tech. 28, 1993, p. 283.
2. **GUJER, W., M. HENZE, T. MINO, T. MATSUO, M.C. WENTZEL, G.V.R. MARAIS:** Basic Concepts of the Activated Sludge Model No. 2: Biological Phosphorus Removal Process. În: IAWQ Specialized seminar, Modelling and Control of Activated Sludge Process, 1994.
3. **HALVARSSON, B.:** Applications of Coupling Analysis on Bioreactor Models, Master of Science Thesis, School of Engineering, Uppsala University, Sweden, 2003.
4. **HENZE, M., C.P.L. GRADY JR., W. GUJER, G.V.R. MARAIS, T. MATSUO:** Activated Sludge Model No. 1. În IAWPRC Scientific and Technical Reports, London, UK: IAWPRC (IAWQ), 1987.
5. **LINDBERG, C-F., B. CARLSSON:** Adaptive Control of External Carbon Flow Rate in an Activated Sludge Process. În: Wat. Sci. Tech. 34, 1996, pp. 173-180.
6. **LINDBERG, C-F., B. CARLSSON:** Nonlinear and Set-point Control of the Dissolved Oxygen Dynamic in an Activated Sludge Process. În: Wat. Sci. Tech. 34, 1996, pp. 135-142.
7. **LINDBERG, C-F.:** Control and Estimation Strategies Applied to the Activated Sludge Process, PhD Thesis, Uppsala University, Department of Materials Science, Systems and Control Group, Sweden, 1997, p. 4.
8. **LONDONG, J.:** Strategies for Optimized Nitrate Reduction with Primary Denitrification. În: Wat.Sci.Tech.26, 1992, pp. 1087-1096.
9. **OLSSON, G., NEWELL, B.:** Wastewater Treatment Systems – Modelling, Diagnosis and Control, IWA Publishing, London, UK, 1999.
10. **TAKACS, I. G., G. PATRY, D. NOLASCO:** A Dynamic Model of the Clarification-thickening Process. În: Water Research 25, 1991, pp. 1263-1271.
11. **YOUSSEF, C., B.G. ROUX, B. DAHOU:** Multivariable Adaptive Predictive Control of Nonlinear Systems: Application to a Multistage Wastewater Treatment Process. În: Proc. of 3rd European Control Conference, Rome, Italy, 1995, pp. 3585-3590.